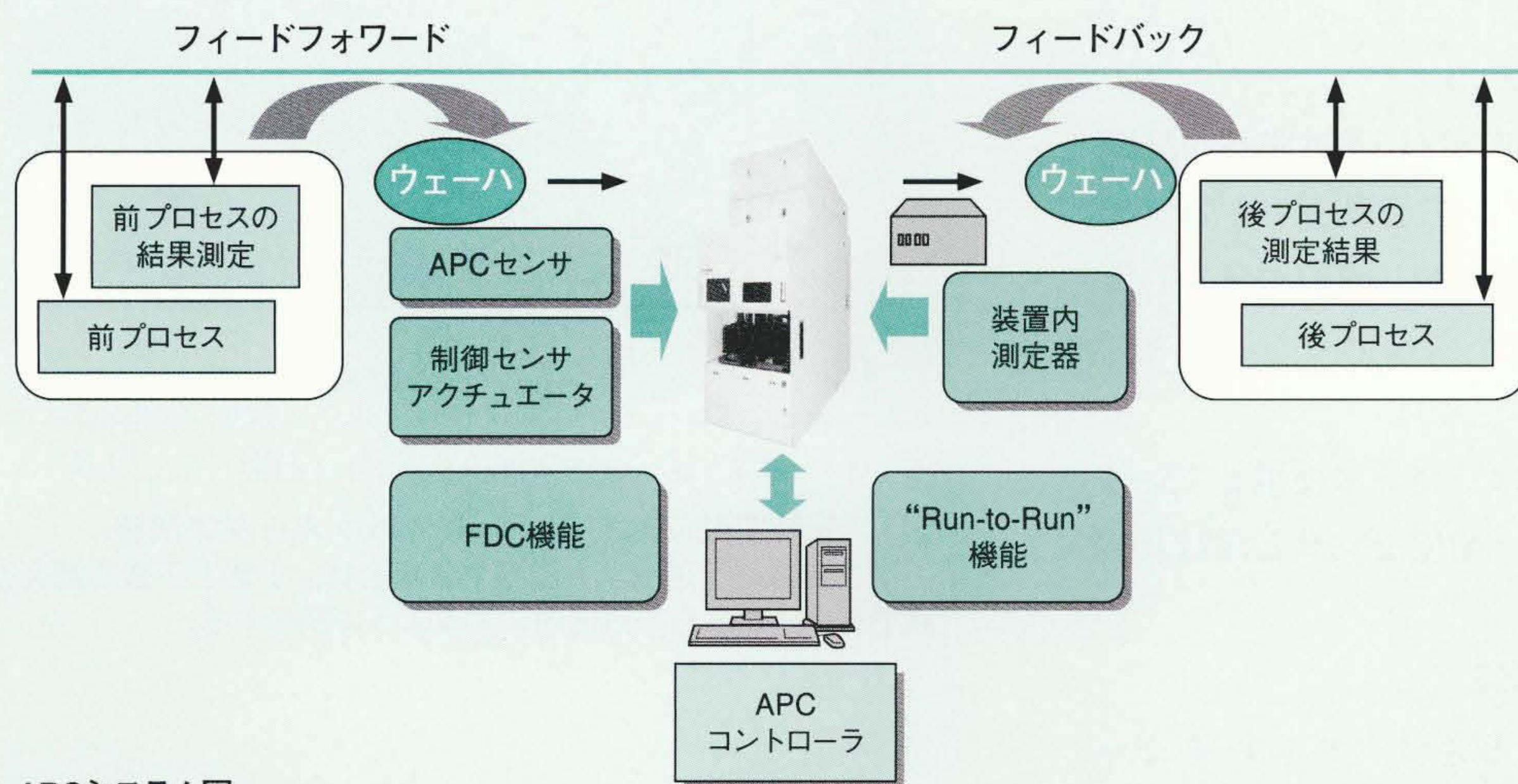


熱処理装置における次世代の成膜安定化技術

Advanced Process Control Technologies for Semiconductor Thermal Processes

松田充弘 Mitsuhiro Matsuda
宮田敏光 Toshimitsu Miyata

島田真一 Masakazu Shimada
渡辺智司 Tomoji Watanabe



APCシステム図

注：略語説明ほか

APC (Advanced Process Control)

FDC (Fault Detection and Classification)

Run-to-Run; 実行ごとに条件を調整し、結果を目的に近づける技術

成膜安定化技術の概要

半導体製造装置付属のコンピュータで成膜情報の蓄積やシミュレーションを行い、成膜条件パラメータを最適化することにより、均一でかつ安定した成膜を実現する。

半導体製造の分野では、APC (Advanced Process Control) への取り組みが本格的になってきている。成膜装置では、100 nm以降のデバイスに対応するため、時間経過による装置状態の変動を除去し、ウェーハ間の成膜差異や装置機差を解消し、安定した成膜を行うことが必須である。また、装置状態監視能力の向上により、予防的な保全を実行することが必要である。さらに、装置立ち上げ時間の短縮やバッチ炉での小ロット生産の実現により、装置をいっそう有効に活用することが可能となる。

日立グループは、バッチ処理式成膜装置に適用が可能なAPCコントローラやプロセス解析ツールにより、(1) バッチ内ウェーハ膜厚差異の縮小、(2) バッチ間ウェーハ膜厚差異の縮小、(3) 装置異常の早期検出、(4) 装置立ち上げ時間の短縮、および(5) 処理枚数変動時のプロセスパラメータ調整時間の短縮を実現する。

1 はじめに

半導体デバイスメーカーは、製造装置の微妙な機差の調整や、時間経過による変動の補正を行うことで、歩留りの向上を図っている。この作業は当初、人手で行っていたが、最近では、MES (Manufacturing Execution System: 製造管理システム) によって自動調整を行うのが一般的である。しかし、半導体プロセスの高度化、微細化に伴い、調整は難易度を増していることから、半導体デバイスメーカーが単独でこの作業を行うことは難しくなっており、装置自体の安定稼働の維持・向上の必要性が高まっている。さらに、ダウンタイムとMTTR (Mean Time to Repair) の短縮を図るための装置の状態監視では、大量のデータを、高度に処理することが求められる。

また、ウェーハの大口径化 (300 mm化) に伴ってコスト削減のため、NPW (Non-Product Wafer) の削減が必要である。ユーザーが要求する許容範囲内で成膜を実現

し、不良ウェーハを作らない (= 歩留りを向上させる。) という直接的な解決策が最も重要であり、さらに、装置立ち上げ時にテスト用に使用するモニタウェーハの低減と、フィル ダミー ウェーハの削減も必要である。

ここでは、これらを解決するためのキーとなる APC (Advanced Process Control) 技術について述べる。

2 APCシステムの概要および特徴

株式会社日立国際電気 (以下、日立国際電気と言う。) が開発した APC システムの特徴は以下のとおりである。

(1) 膜厚変動抑制

バッチ連続処理によって変動する膜厚を、目的膜厚範囲になるように制御する。

これは成膜開始時に、成膜時間や成膜温度などのプロセスパラメータを変更することによって実現する。成膜の場合は、結果を基に制御を行う「フィードバック」を主として使用するが、成膜前の状態を基に制御を行う「フィード

ドフォワード」も使用することができる。

(2) 装置異常検知と予知保全

装置の状態を監視し、装置異常やプロセス異常を検知する。さらに進んで、異常が発生する前にその兆候を発見し、予知保全の通知を行う。

検知した異常を、APCコントローラに表示する。MESへの通知や、電子メールでのラインの管理者や装置メーカーへの通知も可能である。異常検知後にプロセス実行を禁止し、不良ロットの発生を最小限に抑えることもできる。

装置の状態を監視するためには、制御に使用しているセンサとアクチュエータに加え、APCセンサと呼ばれる専用のセンサが必要である。

(3) フィル ダミー ウェーハの削減

処理ウェーハ枚数が変動したときに、フィル ダミー ウェーハを使用しない成膜を実現する。

フィル ダミー ウェーハを使用せずに同一条件で成膜を実行すると、期待とは異なる成膜結果になる。ダミーレスシステムによってプロセスパラメータを変更し、期待する成膜を実現する。

(4) 成膜結果の即時検証

成膜結果を即時に検証して、成膜が正常であるかどうかを判断するために、測定器を装置内に搭載する。

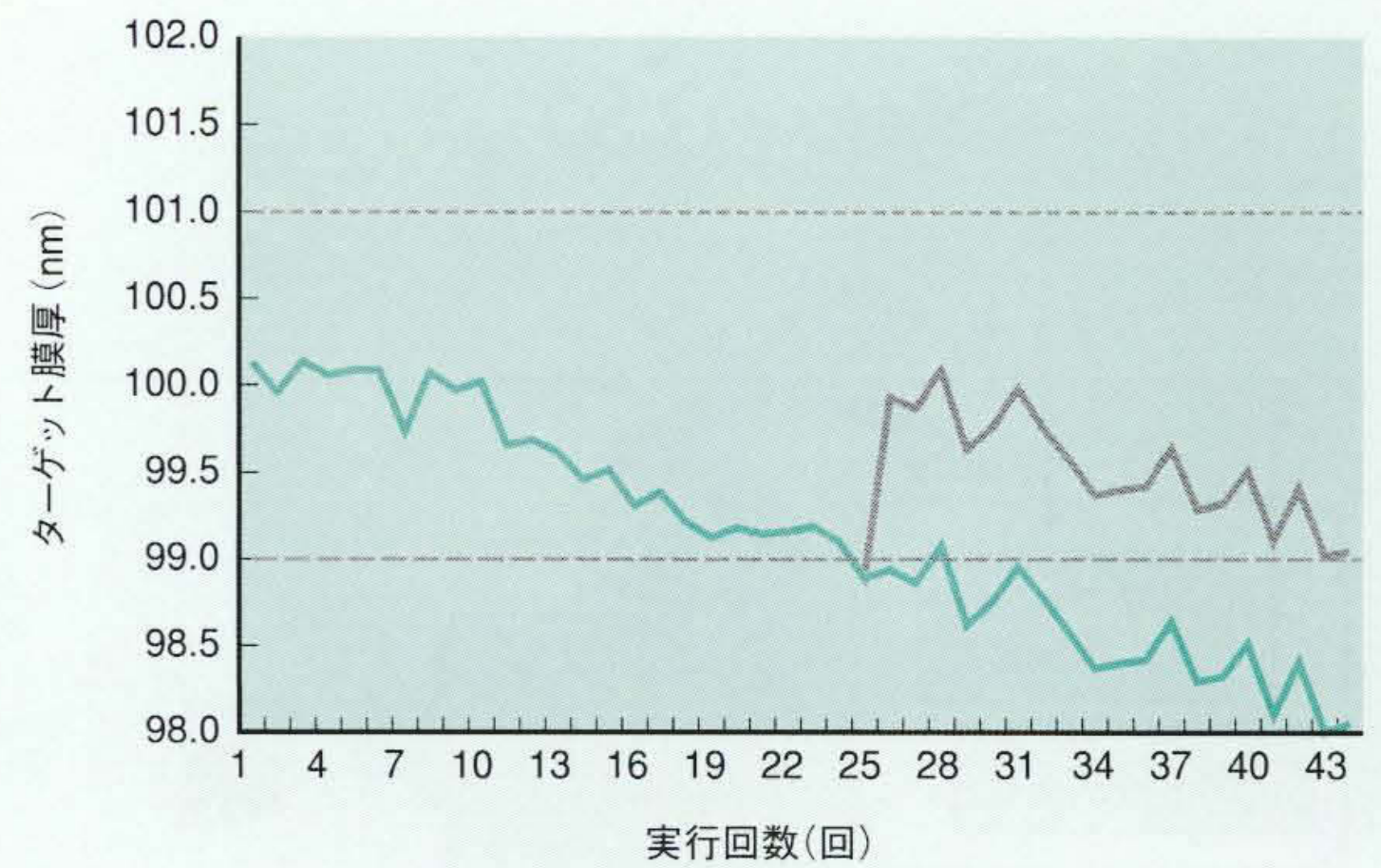
3 成膜装置への適用

3.1 経時変動

バッチ連続処理を重ねると、成膜したウェーハ膜厚が徐々に変動していく。特にCVD (Chemical Vapor Deposition) 炉では、反応管の内壁やウェーハポート、排気管などへの生成物の付着により、成膜結果が変動することが知られており、これまでは人が介在して対応していた。APCコントローラを使用することにより、この変動を低減することが、経時変化への対応である。

成膜時には、プロダクトウェーハと呼ばれる、製品に使用するウェーハのほかに、モニタウェーハと呼ばれる成膜評価専用のウェーハを同時に投入することが一般的である。成膜後にモニタウェーハを膜厚測定器やパーティクルモニタなどで評価することにより、成膜の良否が判定できる。

成膜結果の許容値が広い場合は、プロセスパラメータを調整する必要はない。しかし、デバイスの微細化が進むにつれて許容値も小さくなり、プロセスパラメータを調整することが必要となる。



注：—— (調整なし)，—— (調整あり)，---- (下限)，---- (上限)

図1 経時変動に対するプロセスパラメータの調整

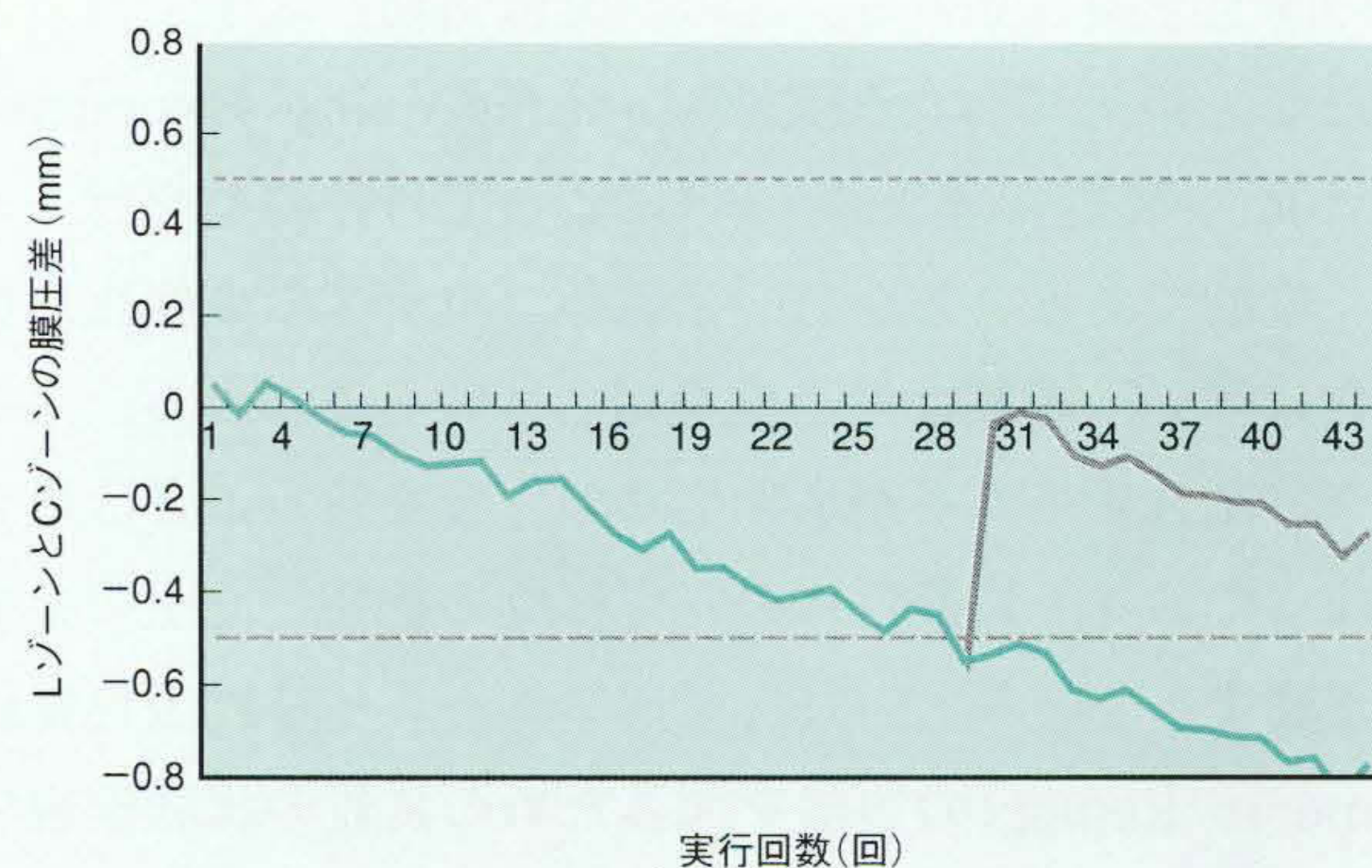
プロセスパラメータを調整する場合は、上限と下限を超えた時点でを行い、これらの限度内に入るように制御する。

プロセスパラメータを調整した場合と調整しなかった場合の比較を図1に示す。

この例では、実行回数が増えるにつれて膜厚が薄くなっている。プロセスパラメータを変更する場合は、ある設定膜厚 (図1では100 nm ± 1 nm) になったときにプロセスパラメータを調整するようにAPCコントローラが制御する。この場合、成膜を厚くするように成膜時間を増加させる。この制御により、成膜結果は再びターゲット膜厚に近くなる。

3.2 ゾーン間変動

バッチ処理炉のウェーハポートには、100枚程度のウェーハを搭載する。装置立ち上げ時に各ウェーハの状態を均一になるように設定するが、外部環境の変化や経時的な



注：—— (調整なし)，—— (調整あり)，---- (下限)，---- (上限)

図2 CゾーンとLゾーンの膜厚差による制御

経時変動と同様に、膜厚差を調整する場合には、許容範囲を超えた時点でを行い、この範囲の中に入るように制御する。

変化により、各ウェーハの状態の差は少しずつ大きくなっていく。APCコントローラを使用して、この変動を低減する。

日立国際電気の縦型炉では、ウェーハを加熱しているヒータユニットを5ゾーンに分割〔上から、U(Upper)、CU(Center Upper)、C(Center)、CL(Center Lower)、およびL(Lower)とする。〕して、制御している。

Cゾーンでは、3.1で述べた経時変化の方式によって成膜の変動を抑える。それ以外のゾーンでは、Cゾーンとの成膜の差によって成膜の変動を抑える。CゾーンとLゾーンの差に着目した例を図2に示す。

CゾーンとLゾーンの膜厚差に着目し、この差がある許容範囲(この例では ± 0.5 nm)になった場合、Lゾーンの温度を変化させる。図2の例では、CゾーンとLゾーンの膜厚差が経時的に変動したと仮定している。Lゾーンでは、Cゾーンに比べて膜厚の減少が大きい。膜厚差が -0.5 nmになった時点でAPCコントローラがLゾーンの温度を上昇させるように制御することにより、成膜変動を抑制する。

実際の炉内では、Lゾーンのウェーハ温度がCゾーンのウェーハ温度に対して低くなっているために、この現象が発生していると考えられる。Lゾーンの温度上昇は、LゾーンとCゾーンのウェーハ温度の変動を抑制することになると考えられる。

上記のLゾーンと同じ制御をCLゾーン、CUゾーン、およびUゾーンに適用することにより、ウェーハポート全体の均一な成膜ができる。

4 ダミーレスと装置内測定器

4.1 ダミーレス

バッチ処理炉の運用では、フィル ダミー ウェーハを使用することが一般的である。プロダクトウェーハが変動したときに、成膜安定化を図るためにフィル ダミー ウェーハを使用し、ウェーハポートには常に同一枚数のウェーハを搭載する。これにより、プロダクトウェーハの膜厚均一性を確保することができる。

口径200 mmウェーハ装置では、フィル ダミー ウェーハが前プロセスでのウェーハの欠落に対応するために用いられていたため、フィル ダミー ウェーハは数枚から十数枚で十分であった。

今後、主流になる口径300 mmウェーハ装置では、生産性を上げるためバッチ処理炉で50枚などの小ロット生産が要求されている。従来技術では、フィル ダミー ウェー

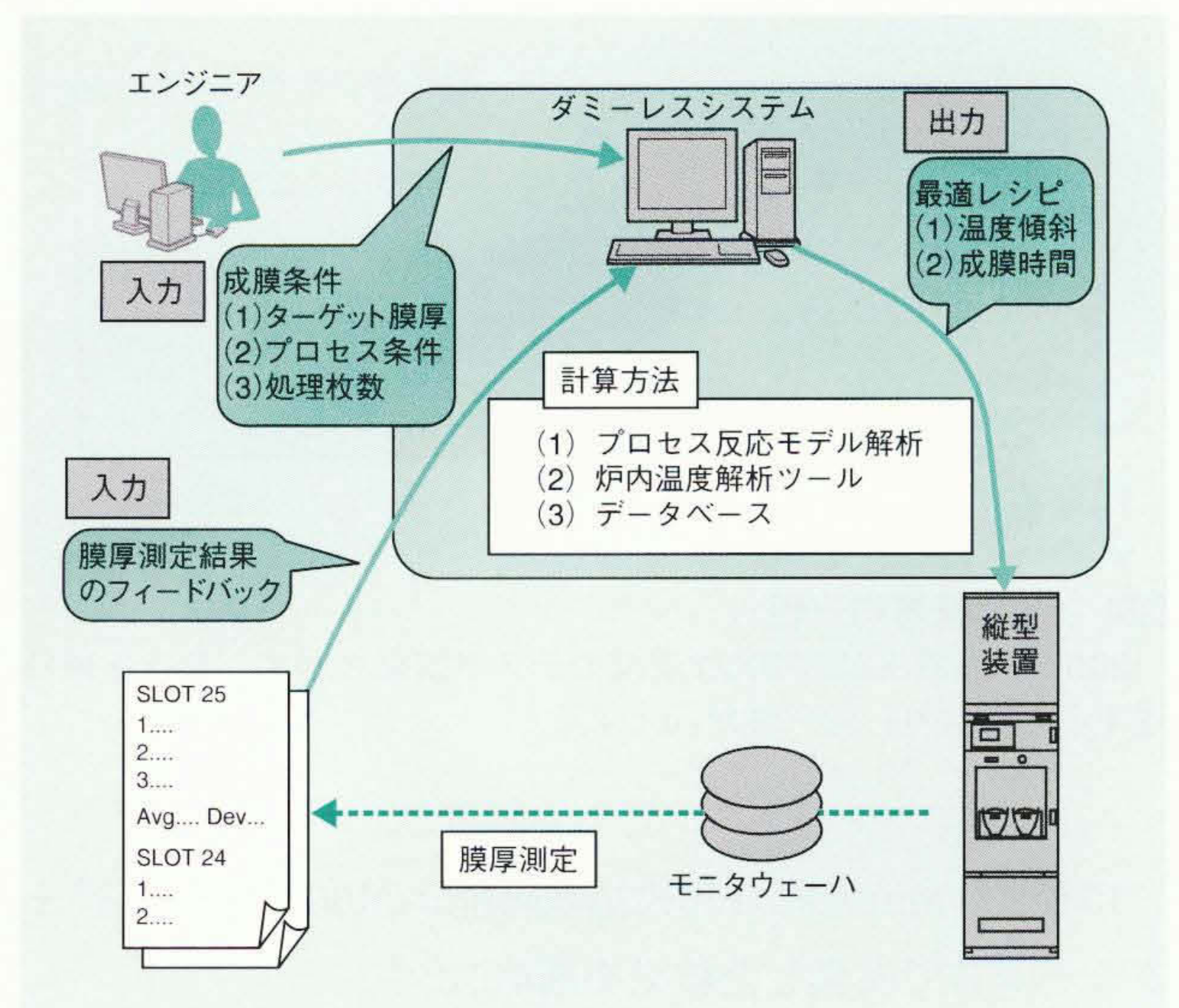


図3 ダミーレスシステムの概略構成

レシピ情報や測定データを基に、目的とする生産ウェーハ枚数を成膜するために最適なパラメータを算出する。

ハを用いフルチャージする必要がある。

ダミーレスは、フィル ダミー ウェーハの削減を実現する技術である。フィル ダミー ウェーハの削減は、ウェーハポートに搭載するウェーハ枚数の変化を意味する。すなわち、変動する枚数に対応してプロセス条件を変更する必要がある。

ダミーレスシステムの構成を図3に示す。

ダミーレスツールでは、装置に依存するヒータ特性などの情報と温度、圧力、ガス流量、時間などの成膜条件と目標膜厚、および搭載したウェーハ枚数を入力して、次に述べるプロセス反応モデルや干渉補正計算を用い、推奨するプロセスパラメータを算出する。

プロセス反応モデルは、ダミーレスのキーとなる技術である。

従来の反応解析は、三次元または二次元で行っていた。これは、精度は高いが、計算量や考慮するパラメータが多く、計算に長時間を要していた。

そのため、プロセス反応を一次元で解析する手法を開発した。これによって高速計算が可能になる。精度は二次元解析とほぼ同等であり、約500倍のスピードで計算可能である。

推奨したプロセスパラメータでプロセスを実行することにより、目的とするウェーハ枚数での成膜ができる。この結果をシステムにフィードバックすることにより、推奨するプロセスパラメータの精度をさらに上げることが可能である。

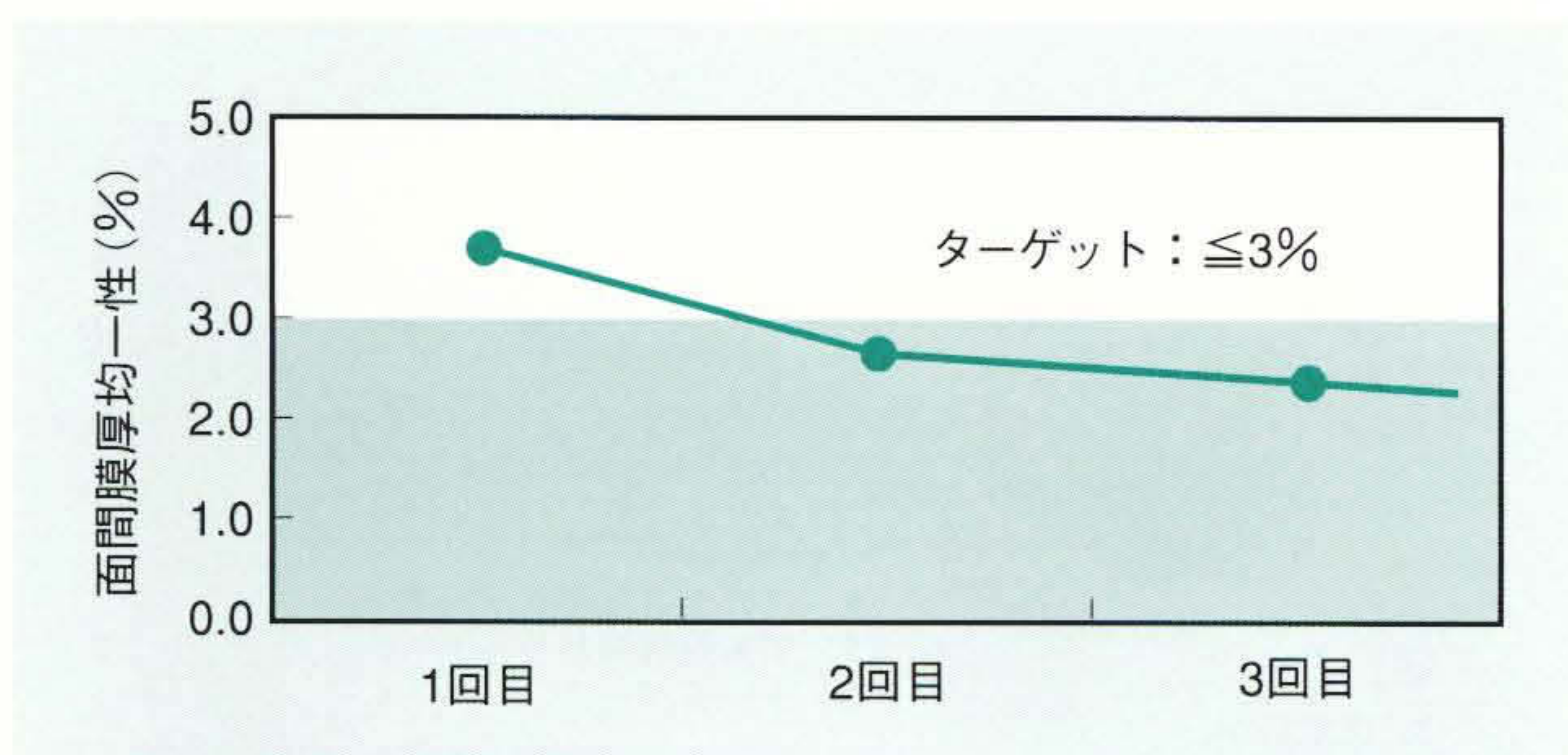


図4 面間膜厚均一性

200 mm装置Si₃N₄膜100枚成膜のテスト結果を示す。実行を繰り返すことにより、均一性が向上する。

口径200 mm装置(150枚搭載可能)で100枚のSi₃N₄膜をダミーレスで成膜した結果を図4に示す。

第一回目の実行では、面間膜厚均一性は3.74%である。結果をダミーレスシステムにフィードバックすることにより、面間膜厚均一性を2.59%、2.27%に向上することができる。

日立国際電気は、プロセス反応モデルの解析精度向上技術やデータベース付加技術を開発中であり、膜厚均一性の向上を目指している。

4.2 装置内測定器

プロセス結果の良否を判定するための膜厚測定器、パーティクル測定器、シート抵抗測定器や濃度測定器などは、半導体製造工場のラインに設置されるのが一般的である。

しかし、ウェーハを装置から測定器に移動し、測定を完了するまでは最低でも2～3時間を要する。もし、異常な成膜が発生したとしても、それが判明するのは測定す

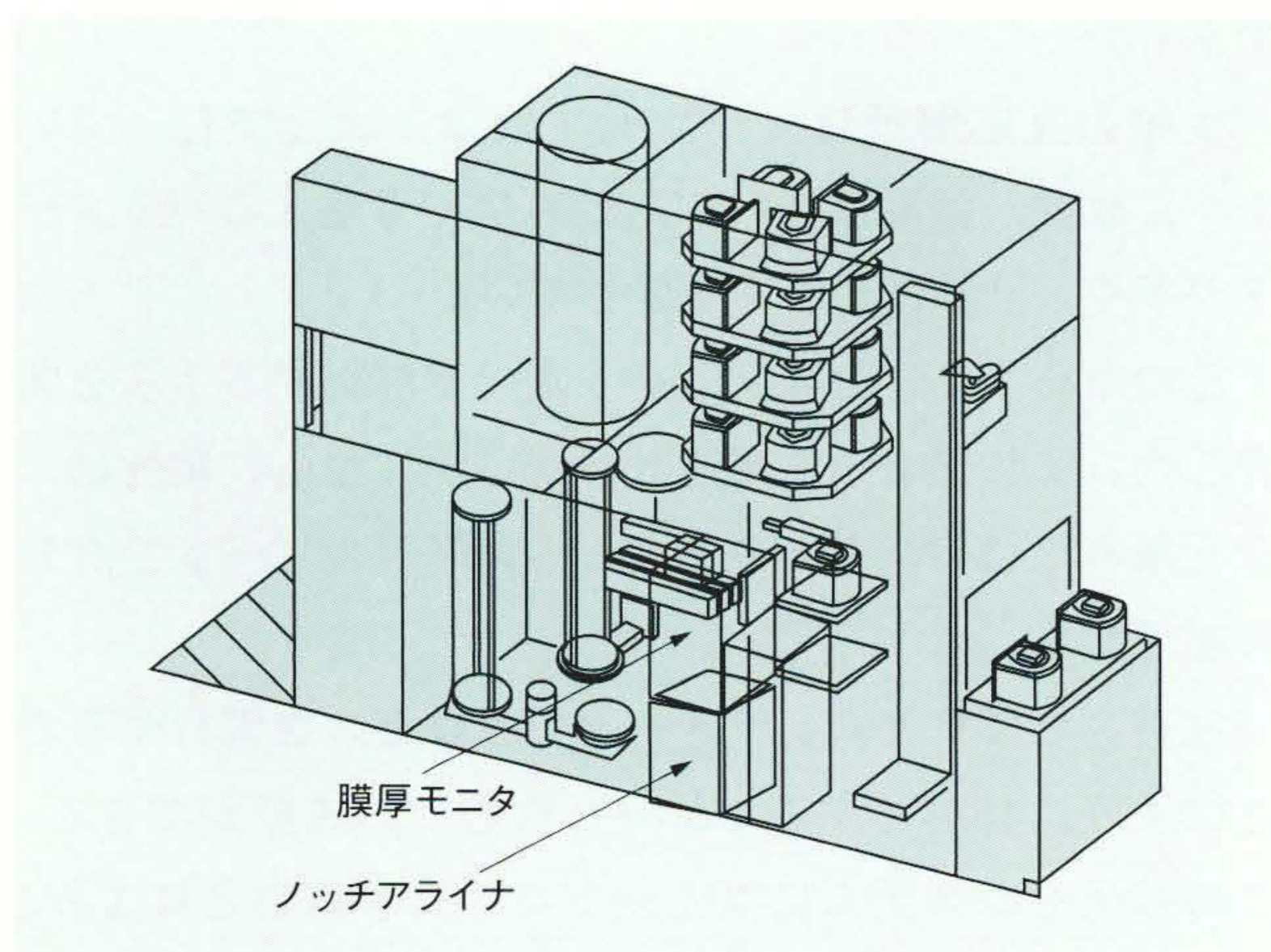


図5 膜厚モニタの装置内組み込み例

装置内に膜厚モニタを搭載した例を示す。

る時点である。生産性を上げるため、結果が判明する前に次の成膜を実行した場合、同一装置で再び異常となるウェーハ(不良ロット)を作成する可能性がある。

これを解決するためには、装置内に測定器を搭載し、その場で測定する必要がある。このため、日立国際電気は、膜厚モニタやパーティクルモニタなどを搭載する装置を開発中である。

膜厚モニタを装置に搭載する例を図5に示す。

5 おわりに

ここでは、熱処理装置における次世代の成膜安定化技術について述べた。

日立国際電気は、成膜装置メーカーとして、成膜装置自体の性能向上に加えて、ここで述べたような技術による装置のいっそうの高機能化と高品質化に取り組んでいる。また、熱処理装置単体ではなく、半導体工場のラインに配置される一つの装置という観点から、前後工程との連携についても研究を進めている。

今後、これらの成膜安定化技術をさらに進展させることにより、システムとしての装置の性能の向上に努めていく考えである。

執筆者紹介



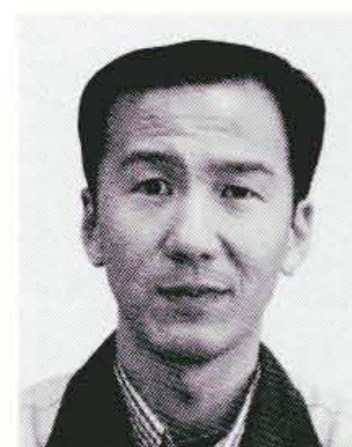
松田充弘

1989年国際電気株式会社入社、株式会社日立国際電気 電気機械事業部 半導体装置システム研究所 所属
現在、APC技術の開発に従事
電子情報通信学会会員
E-mail: matsuda.mitsuhiro@h-kokusai.com



宮田敏光

1996年国際電気株式会社入社、株式会社日立国際電気 電気機械事業部 半導体装置システム研究所 機構開発部 所属
現在、半導体製造装置とAECの技術開発に従事
精密工学会会員、応用物理学会会員
E-mail: miyata.toshimitsu@h-kokusai.com



島田真一

1990年国際電気株式会社入社、株式会社日立国際電気 電気機械事業部 半導体装置システム研究所 機構開発部 所属
現在、インライン モニタリング システムの開発に従事
E-mail: shimada.masakazu@h-kokusai.com



渡辺智司

1984年日立製作所入社、機械研究所 第六部 所属
現在、半導体製造装置および製造プロセスの開発に従事
日本機械学会会員、計測自動制御学会会員
E-mail: wtanabe@gm.merl.hitachi.co.jp